

粒子モデルの指導

下村 忠行¹ 安藤 憲二²
五十嵐義郷³ 館岡 信男⁴

1 はじめに

新しい指導要領においては、「科学的探究活動をとおして基本的科学概念をは握させる」ことを、理科教育の大きなねらいとしている。そして、基本的科学概念として、具体的には「物質」、「エネルギー」、「時間・空間」、「生命」の諸概念をあげている。これらの中で、物質概念とエネルギー概念は、第1分野、第2分野両分野の内容に共通しているという点で、特に重要な概念である。この2つの概念と、より基本的と考えられる時間・空間の概念をとおして、生命についての見方・考え方も養われていくと考えられる。

従来、物質の粒子性の指導は、エネルギー概念の指導と同様に、定性的な取り扱いに終始しがちであった。しかし、探究的な学習においては、ミクロの世界を単に膨大な数の極微粒子の世界として片づけてはならない。既習経験と有効ないくつかの実験・観察を積み重ねて、定量的に物質の粒子モデルを導入し、粒子モデルによる予言、検証、修正をくり返しつつ、エネルギー的にミクロの世界 — 躍動する粒子の世界 — についての理解と確信を深めていくことが必要であると思う。

本報告は以上のような考え方で、物質の粒子モデルの指導について種々検討し、実践した結果をまとめたものである。

2 研究のねらいと指導計画

(1) 研究のねらい

本研究の主なねらいは、第2学年を対象に

- ① 探究的に粒子モデルを形成すること
- ② 粒子の大きさや数について、定量的には握すること
- ③ エネルギー的な見方・考え方を養うこと
- ④ 確率的な見方・考え方を養うこと

である。すなわち、探究的に粒子モデルを導入して、予言・検証・修正をくり返しなが、より高次のモデルへと発展させていく。単分子膜の実験により、単分子膜の厚さから粒子の大きさや数を求めて、極微とか無数といった莫然としたものでなく、科学的な探究によって、はっきり数値として扱うことができるということをつかませる。また、つねに粒子の運動をエネルギー的にとらえさせ、さらに多数の粒子の示すマクロ（巨視的）の事象との関連に注目させて、確率的（統計的）な事象についての考え方に對する素地を育成していく指導について、研究・実践しようとするものである。

1 新潟県立教育センター

2 小千谷市立小千谷中学校

3 北蒲原郡中条町立中条中学校

4 見附市立見附中学校

(2) 指導計画

実践研究を行なった3校とも、それぞれ使用する教科書が異なり、そのために第1学年での移行措置の内容もかなり違っている。したがって、粒子概念に関する既習経験が必ずしも同じとはいえない状態から出発しなければならなかった。しかし、種々討論と実験を重ねて研究した結果、指導の流れを次のようにきめて実践を行なった。

指導の流れ

〔1〕粒子モデルの導入

ブラウン運動と拡散の現象の観察から粒子モデルへ到達する。

〔2〕粒子モデルによる予言

気体の法則(ボイル・シャルルの法則)を粒子モデルにより理解する。

さらに、結晶成長を中心として、固体の粒子モデルを考え、モデルによる予言・検証を行なう。

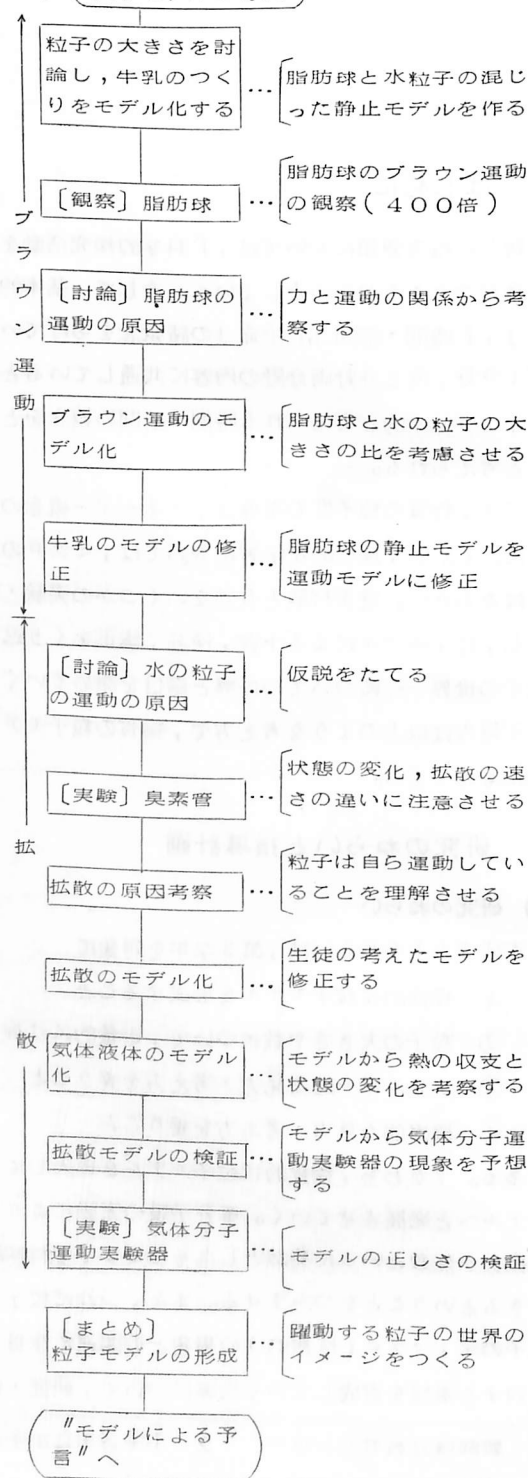
〔3〕粒子の大きさ

単分子膜の実験を中心に、粒子の大きさや数を定量的には握し、粒子概念の定着をはかる。

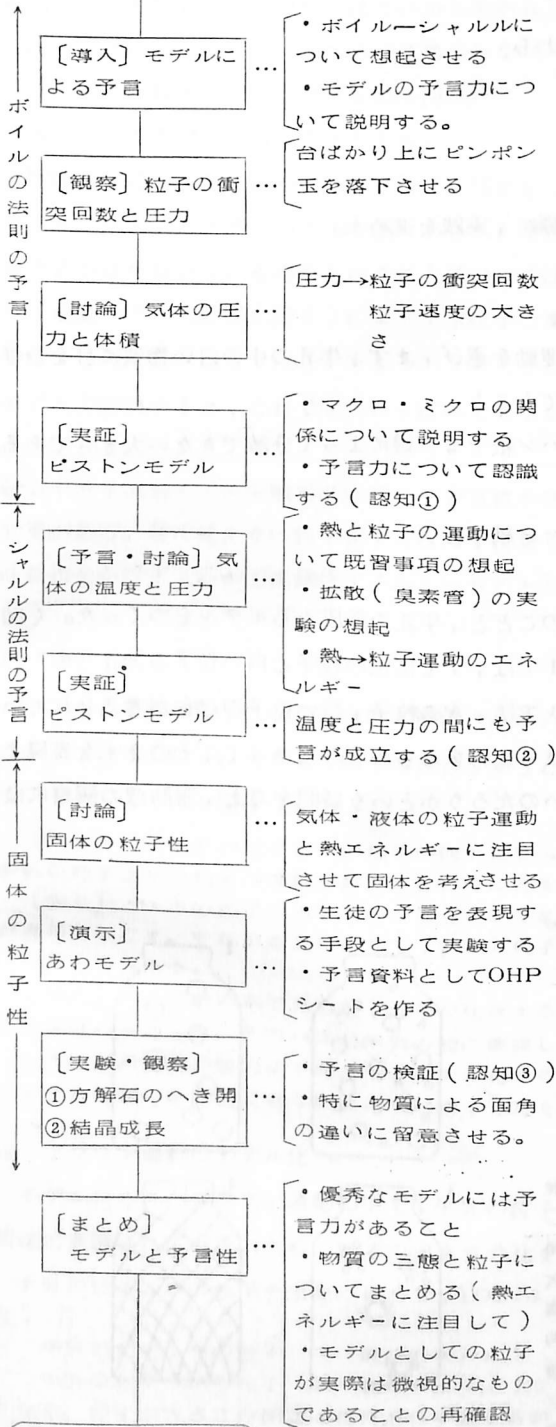
右の流れ図は、各項目の指導計画を示したものである。

なお、それぞれの実践経過・結果は次の第3～第5節に、また、粒子概念についての事前調査と事後調査の結果を第6節に示す。

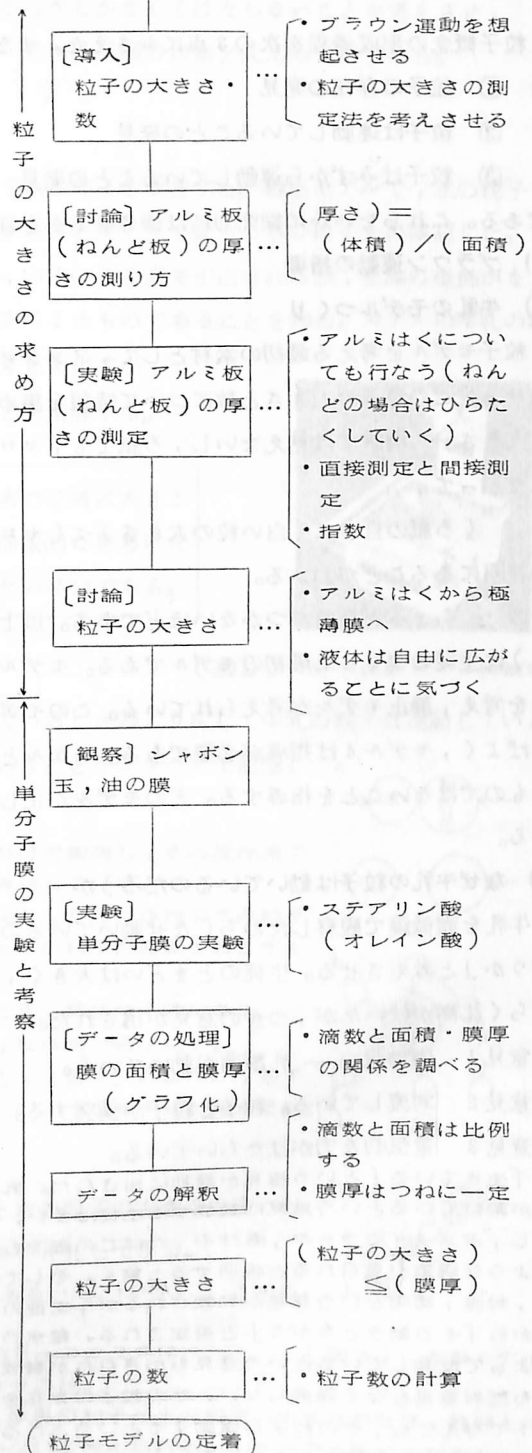
〔1〕粒子モデルの導入



〔2〕 粒子モデルによる予言



〔3〕 粒子の大きさ



3 粒子モデルの導入

粒子概念の形成過程を次の3点におさえた。すなわち

- ① 粒子の存在の発見
- ② 粒子は運動していることの発見
- ③ 粒子はみずから運動していることの発見

である。これらをいかに探究的には握させるかを目標に、実践を進めた。

(1) ブラウン運動の指導

(a) 牛乳のモデルづくり

粒子モデルを考える最初の素材として、ブラウン運動を選び、まず、牛乳の中の白い物質に目をむけさせる。この粒子の大きさと数について情報を集めてみると、

大きさ — 肉眼では見えないし、ろ紙でも、セロハン紙でもろ過によって分離できない大きさである。したがって、

(ろ紙の目) < (白い粒の大きさ) < (セロハン紙の目)

の範囲にあることがわかる。

数 — ちょっと見当がつかないほどである。以上のことと、牛乳の組成からモデルをつくった。(図1)は生徒のつくった最初のモデルである。モデル1では、すでに水の粒子と白い粒子の大きさのちがいを考え、静止モデルが考えられている。このモデルでは、水の粒子、白い粒子の存在が考えられていればよく、モデル4は指導が必要である。モデルとは考え方をあらわすのであって、そのままを表現するものではないことを指導する。どのモデルが正しいのだろうかという疑問を与え、脂肪球の観察にはいる。

(b) なぜ牛乳の粒子は動いているのだろうか

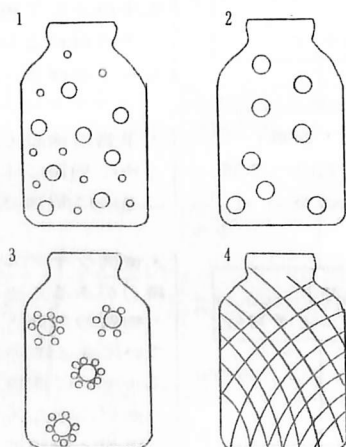
牛乳を顕微鏡で観察したのち「なぜ動いているのだろうか」と考えさせる。生徒のとまどいは大きく、しばらく沈黙が続いたが、つぎの意見が出された。

意見1 生物説 — 乳酸菌が動いている。

意見2 対流している。粒子と粒子が衝突する。

意見3 電気的な力がはたらいている。

「生きている」という意見が最初に出された。乳酸菌が動いているという意見に賛成する生徒は多い。しかし、ポスターカラーや、墨汁や、たばこの煙でも同じような現象が見られると説明すると驚く。そして次に、対流、衝突という意見が発表されるが、生徒の観察から「その動きとちがう」と否定される。電気力によって反発しているという意見も出されたが賛成意見も反対意見もなく発展しない。水の粒子の存在をヒントで与えても、その粒子が運動するということまで到達するのは困難と考えられる。

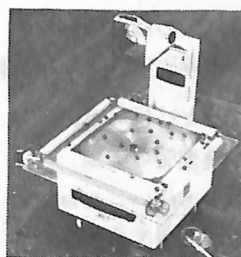


(図1) 牛乳のモデル (○牛乳の粒子。水粒子)

説明が困難になったところから目に見えない粒子との対話が行なわれる。考えの糸口として、次の3点をあげて考察させる。生物ではないから他から力がはたらかなくはないことを考えさせ、

- ① 物体に力が及ぼされなければ運動をしない——力とは運動の状態を変えるものである。
- ② 牛乳の粒子に力を及ぼすものは何か。
- ③ どんな力がはたらくのだろうか。

と問題をしぼる。この説明により生徒は自信をもって水の粒子を予言する。静止モデルで、水の粒子を考えた生徒も、ポスターカラーや墨汁から水と関係があると考えた生徒も、水の粒子を再確認した。どんな力がはたらいているのかということについては、いろいろな意見が出されるが、推論の根拠がなく分子運動モデル実験器(図2)により、水粒子の衝突によるものであることを知る。モデルの牛乳の粒子について、「そっくりだ」「少しちがうよだ」と意見を出す、モデルで表現すると、これでせいっぱいであることを指導する。



(図2) 分子運動モデル実験器

観察や分子運動モデル実験器は生徒の学習意欲や学習の定着に大きな効果がある。目に見えない粒子相手だけに、言葉や抽象的な思考にだけ負担をかけず、いかに具体化するかということがたいせつである。

(c) 運動モデルへ

モデルと実際の粒子との対応の中に解決されないでいる「どのようにして牛乳の粒子は運動しているのか、また水の粒子はどうして動くのだろうか」ということをグループで討議しモデルをつくった(図3)。

〔図a〕・・・牛乳の粒子と水の粒子が何かのきっかけで衝突し、その反作用で牛乳の粒子と水の粒子が運動をおこすということを表現している。

〔図b〕・・・水の粒子同士が何かのきっかけで衝突し、その反作用で水の粒子が運動をおこす。それが連鎖反応して、牛乳の粒子と水の粒子が運動をおこすという考え方である。

〔図c〕・・・何かの本で見たが、分子が化合するとき、結びつく手がある。その手はバネだった。そのバネが牛乳の粒に衝突し、反作用で飛びだす。

水の粒子の運動の原因まで考えて、モデル化すると、〔図a〕のように、粒子の大きさの違いが区別できないグループや、〔図c〕のようなモデルが発表された。

(d) ブラウン運動のモデル化へ

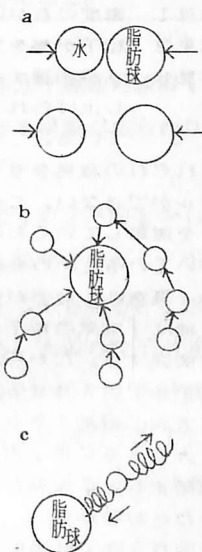
モデル化されたブラウン運動の中で、牛乳の粒子と水の粒子の大きさの違いが明確に意識されていないため、両者の大きさの比をモデル化してみる。

牛乳の粒子と水の粒子を生徒の見当で、100:1、あるいは、1000:1 とすると、

牛乳の粒子：水の粒子 = 龍球のボール：Q5cmのガラス球

牛乳の粒子：水の粒子 = 龍球のボール：ゴゴマの粒

となる。粒子の大きさの測定はこれから学習するが、牛乳の粒子と水の粒子の大きさの比は、龍球とゴゴマの粒くらいになる。龍球にゴマを衝突させても動かないと考えられるが、それでも動くとなると、



(図3) 運動モデル

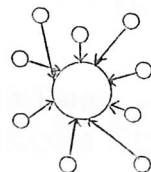
①水の粒子はうんと多くなければならない

②水の粒子はうんと速くなければならない

ということを生徒は感覚的に予想できた。以上のことから〔図b〕の方がより正しいことが確認され、修正する。水の粒子の運動の原因を「何かのきっかけ」とおさえ、水の粒子は、牛乳の粒子に、ちがった角度で、ちがった瞬間に、ちがった速さで衝突することが考えられることから(図4)のモデルが確認された。

(e) 牛乳のモデルの修正

運動するモデルができたところで、牛乳の粒子は脂肪球であることを説明し、牛乳1本分の中に脂肪球が1億の1万倍もあり、水の粒子はさらにその何万倍か、何億倍かあるだろう。そして脂肪球に水の粒子が衝突して、大げさにいうなら脂肪球が、わいわいと動きまわっていると想像しなくてはならない。それを全部表現できないので(図4)のようにモデルで表わすと説明し提示した。数の多さと、運動していることに、生徒は驚きの声をあげた。



(2) 拡散の指導

ブラウン運動では水の粒子の運動の原因については解決していない。「何かのきっかけ」とは何かを解決しようと説明して学習にはいる。

(a) 臭素管の実験

(図4) ブラウン運動

空気のはいった臭素管と、真空の臭素管を冷却し、これを室内に放置したら、固体から液体、さらに気体に変化するだろうと予想をたてさせ、観察にはいる。室温20℃で、真空の方は3分で、空気のはいっている方は10分で下部は色が濃くなり、拡散は、半分くらいである。

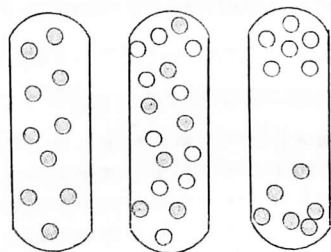
以下考察と問題点を述べる。

① どうして臭素が管内いっぱいにはひろがったのか

意見1 密度のちがいによる。

意見2 粒子が熱を受けたので管内いっぱいにはひろがった。

意見3 水が沸騰すると水蒸気になる。その水蒸気は何かにおし上げられている。だから臭素も何かにおし上げられている。



それぞれの意見をモデル化したのが(図5)である。意見2はモデルができない。このモデルは、拡散が完了した後のモデルで粒子を運動しているものというは握ができていない。粒子が自身で動いているという発想は出されなかった。

(図5) 拡散のモデル ・臭素
・空気

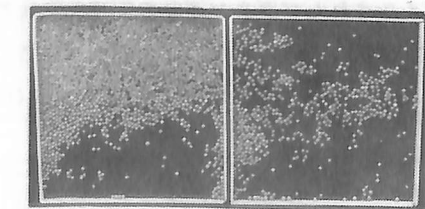
② 真空にした方が空気のはいっている管より拡散が速いのはなぜか。

生徒は「空気の粒子がじゃまをするから」と考える。つまり、臭素の粒子が運動するとき、空気の粒子と衝突する。だから遅くなると考える。この考え方をモデルで考えさせる。大豆とあずきを盆の中に入れ、水平方向に振動すると、ほぼ、一様なひろがりができる。大豆とあずき、大豆だけのものを重ねて同じ条件で振動すると、大豆とあずきのはいった方は拡がりが遅いことがわかる。

(図6)は、乾燥剤(シリカゲル)の粒子の着色したものとししないものを使い実験したものである。あきらかに、粒子が多いと衝突が多く起こることにより時間がかかることがわかる。

③ “何かのきっかけ”とは何か

臭素管に外から与えた影響は、熱であることはすぐ



(図6) 拡散のモデル

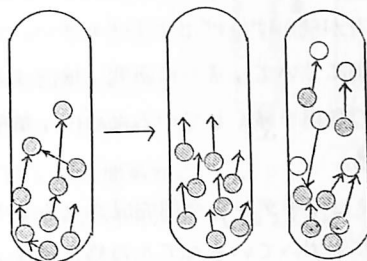
に理解できる。熱が状態を変化させることも理解できる。しかし、熱と粒子の運動の関係は、なかなか発見されない。何かのきっかけで衝突がおこると考えている生徒に次のような問題点があることをまとめてやる。

① 粒子同志の衝突によって運動が始まるなら、粒子の多い空気のはいった臭素管の拡散の速さが説明できない。

② 衝突による運動は、やがて運動は止まってしまう。

③ 熱を与えると固体は溶けて、気体になる。熱を奪うと逆の現象がおきる。

このことを解決するために「粒子はみずから運動している。そして、何かのきっかけは熱である」という仮説がたてられる。この仮説により、①の問題が解決できた。(図7)は、仮説により修正されたモデルである。



(図7) モデルの修正

熱と粒子の運動の速さの違い、および物質の三態と密度の問題を硫酸銅水溶液と水の拡散の実験から

液体 — 粒子の速さは小さい。密度は大きい。

気体 — 粒子の速さは大きい。密度は小さい。

とまとめ、モデルをつくり、熱の状態の変化の関係をまとめた。

牛乳の粒子は水の粒子の衝突によってブラウン運動をしているが、水の粒子が運動していること、粒子に運動を与えるものは熱であること、粒子の運動は永久運動であることなどを、生徒自身に発見させることは、非常にむずかしい。直感で、粒子自身が運動していることを発見できても、熱との関連を論理的に発見させることは困難である。この点に関しては、教師の適切な助言が必要である。

(b) 仮説の検証

物質をつくる粒子は熱によって運動しているということを確認するために、気体分子運動実験器(硬質ガラス管内に、水銀とガラス粒を封入したもの(図8))を熱したらどのような現象があらわれるかをモデルにより予想をたてさせる。

生徒の予想では、「水銀が膨張して管内いっぱいになる」「水銀が膨張して、ガラス粒をおしあげる」「水銀が沸騰してガラス粒をおし上げる」という意見が出された。いずれも粒子ということが思考に定着しておらず、膨張、沸騰というマクロな現象の表現をしている。モデルをつくらせると、水銀を粒子としてとらえられずに、管内を対流しているモデルができるグループがある。水銀の粒子が運動していること、水銀の粒子が、ブラウン運動のように、ガラス粒に衝突するだろうということを討議によりまとめ、実験をする。水銀の粒子は目には見えないが、ガラス粒がとびはねて、水銀粒子がすごい速さで衝突していることが確かめられた。生徒の驚きは大きく、いつまでも観察していた。「ガラス粒が本当に運動するとは考えられなかった」というのが生徒の正直な感想である。

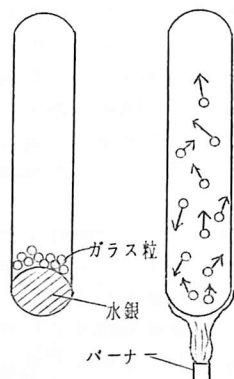
(3) まとめ

躍動する粒子の世界を実験と思考との積みあがで、粒子とは目に見えない小さなものというイメージから、ものすごい速さで運動している小さい粒子へとイメージを修正できたが、これで粒子の概念が完成されたとは考えられない。さらに多くの現象から、定量的には握させる必要がある。

なお、問題点としては、次の2点があげられる。

- ① 論理的な思考の好きな生徒は大きな興味をもって学習するが、一方では思考が続かず投げ出す生徒も多い。女子に特にそれが感じられる。指導計画について、さらに研究、検討する必要がある。
- ② 生徒の負担を軽くしてやるために、積極的な助言や適切な準備が必要である。

たとえば、モデルを全部完成させるまでの指導はたいへんなことで、途中でつまづいているモデルの修正には、細かい配慮による助言を与え、修正に必要な各種の実験の準備がなされていなければならない。また、生徒の考えたモデルを、モデル実験で試してみるなど、興味を持続して学習できるような態勢を作ることが大事だと考える。



(図8) 気体分子運動実験装置

4 粒子モデルによる予言

第1学年で物質をマクロ的に扱い、第2学年になってミクロ的な見方で物質をとらえてくるわけであるが、事前意識調査にもみられるように、生徒はテレビ・書籍等から先入観念として物質を粒子でとらえる見方を知っている。しかし、頭初は幼稚だった概念も拡散現象やブラウン運動の観察から熱エネルギーと粒子運動の関係を知り、修正に修正を加えてモデルを一步一步しっかりしたものにしてきた。ここでは、このように作りあげられてきたモデルが、新しいことを予言できる力を持っていることを経験させ、一般的にモデルがどのような性格をもったもののかについて学ばせたい。

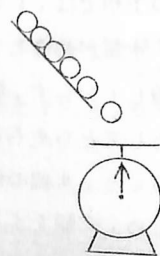
(1) 気体の体積と圧力・圧力と温度(ボイルーシャルの法則)

気体の体積と圧力の関係については既に第1学年では学習済みであり、モデルによる予言ということから考えると、この問題は導入として最適であると考えられる。つまり既知の関係「気体の温度を一定にして、圧力を増すと体積が減少する」ということを粒子モデルを使って説明できないか、という運びでもってゆくのである。

(図9)のように、台ばかりにピンポン玉を落下させ、落下数(粒子の衝突数)と目盛のよみ(圧力)の関係について理解させた後(図10)に示すようなピストンモデルを示し、第1学年でマクロ的に体積と圧力の関係を求めた注射器の実験と対比させた。生徒は

- ・ 注射器中の気体 = ガラス玉
- ・ 熱が一定 = モーターの回転数が一定

ということモデルの形から容易に予想する。ガラス玉の動きについて、「このモデルのガラス玉は上下運動しかしていないが、実際には上下左右ばらばらな動きをしているはずだ」と疑義を申し出る者もあった。



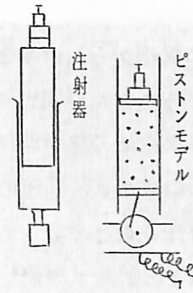
(図9)

体積が増せば圧力が減少するという問題についても単位面積・単位時間の粒子の衝突回数という表現はできないまでも、生徒のことばで、身振りを加えておよその感じはつかんでくれる。そして同じよう

に圧力と温度の関係についても容易に対比し、ぎこちないがその関係をうまく説明してくれた。

(2) 固体粒子の予言

モデルによる予言の導入として、ボイル・シャルルの法則を粒子的に扱うことは、じゅうぶん理解されたと感じられ、また気体の粒子・液体の粒子を実験をとおして見たり予想した生徒に、固体粒子を予言させることなどは、ごく簡単なことであると考えていた。しかしボイル・シャルルの法則のように既知事項と対比させ(図10)ピストンモデルというものではなく、全く無から有を生じさせるような観念で、予言という問題に取り組み、なかなか意見(考え)が出なかった。予言となるとやはりむずかしいものがあるらしく、ここはある程度、導入の段階でもそうだったように、生徒が頭の中に形作っていくことばとしてうまく表現できないものを教師が短い質問で引き出してゆく必要がある。



- 質問 ・ 粒子間は、気体や液体のときと比べるとどうだろう。離れているか、くっついているか。
 ・ 気体や液体に比べると、粒子の動きはどうだろう。

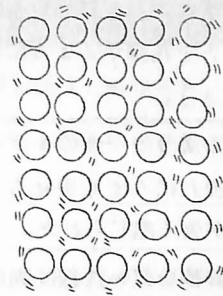
このような質問から返ってきた生徒の考えを一つ一つ黒板に形づくっていくと(図11)のように要約できた。こう考えた根拠を聞いていくと次のようにまとめることができた。

[粒子がぎっしり詰まっていることについて]

臭素管を冷却していくと臭素は液体になって底の方に全部集まってしまったが、それは粒子の間がせばまってきたのだろう。固体ならもっとせばまるだろうから。

[粒子は少しではあるが動いているのではないか]

ブラウン運動の気体・液体を観察したとき、粒子の動きは液体の方が遅かった。固体はと考えれば、気→液→固と変わってゆく過程からみると、気体や液体よりもゆるやかな動きを示すだろう。だから粒子は動いていてもわずかであろう。



(図11) 予言した固体粒子

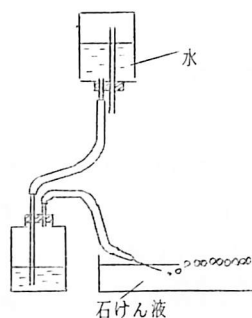
(3) 固体粒子モデルを使った予言と実証

以上のように生徒が考えたモデルによる新事実の予言(固体粒子)もかなりの確で当を得たものであった。

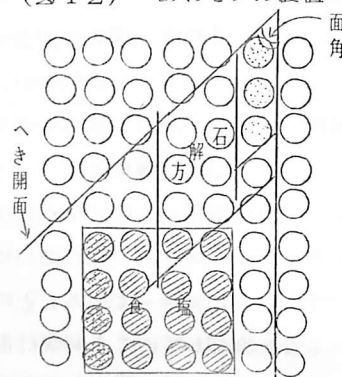
このように生徒がまとめあげた固体粒子のモデルは、それを使ってゆけば未知の事象を予言できるであろう。つまり多方面から得た事実による修正に修正を加えたモデルは、それが優れたものであれば、予言力をもっていることを教えるために、生徒自身が考え出したモデルから予言できる現象が何かないか聞いていった。この場合、第一段階としてシャーレに鉛玉を入れOHPで示し、生徒の考えた固体粒子のモデルの表現として用いてみた。しかし、規則正しい配列という点で問題があったので、(図12)に示すような装置を使って、あわを用いた規則正しい粒子の配列を提示した。けれども空気圧の時間的変化により、不均一な大きさのあわの集団があちこちに表われ、部分的に見れば生徒が考え出したモデルの表現にはなるが、全体では困難な面もあった。

この提示から次の学習(へき開)に発展が期待できる「大きいあわ, 小さいあわの固まりの境がおもしろい」という副産物ともいえる意外な生徒の感想が得られた。

あわの大きさに問題のあるこのモデル(あわモデル)も, 細かいあわを作ることによって, 空気圧の変化を抑えて, 均一な泡の集団に焦点を合わせて撮影した写真を用いると生徒のモデル(図11)の表現としてかなりよいものになる。これをOHPシートに拡大して写し撮ると予想教材として有効なものになった(図14)。これを示しながら「この固体粒子モデルから予想できそうなことはないか」と聞いてみると一様に, 首をかしげていた。泡モデルの実験で感じてくれた大小のあわの境からヒントを得て「へき開」らしい何かを思いついてくれることを期待していたのであるが, 仕方がないのでOHP用指示棒をシート上にへき開面になると思われる線上に黙って置いてみた。するとどうやら棒の意味と泡の大小の境を関連して考えたらしく「アッわかった」という声があちこちで聞かれるようになった。そしてへき開面に相当する線が縦にも横にも斜にもあることを指摘するようになり, だんだんにぎやかになってきた(図13)。



(図12) あわモデル装置



(図13) 結晶のへき開

このような一連のモデル学習の学習で重要なことは, その学習が生徒にとって目新しいことだけに, 流れにうまく乗せることである。そのためには教師の小間切れの誘導的な発問が多分に必要なのが強く感じられた。

「この棒を置いた線は固体だけにみられるものだろう。このことから固体だけがもっている性質が予想できないだろうか」という発問に対して「切れる・離れる・わかれる」という表現でその性質を予想した。

(a) 方解石, 食塩の結晶のへき開

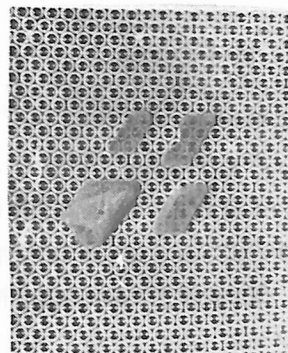
「へき開面を境にして切れる, わかれる」という生徒の予想を実証するために, まず方解石をたたいて割らせ, またへき開に一般性を与える意味で食塩の結晶をカミソリを当てて(結晶の一辺に平行に)鉛筆等で軽くたたいて割り, ルーペで観察させた。その後, 再びOHPにより生徒の考えた予想を思い出させた。そして方解石をOHPシートにのせると(図14)のようになり, それを見て「アーなるほど」とその感概を素直に表明していた。

へき開をとおしてモデルの予想性を確かめるこの演示で, (図14)のようなOHPシートの上に物質の結晶を上げて実証の終結とする方法は, 生徒に驚きと同時に学習に対する成功感を味わわせるという点で非常に効果的であった。方解石より硫酸銅の結晶の方がやりやすいようである。

(b) ザロール(サリチル酸フェニル)の結晶成長

方解石・食塩の予言実証で興味を感じた生徒に、結晶が成長する過程を予言させると、先の経験をもとにかなりまとまった意見を述べる。

「食塩の結晶は大きいものも小さいものも形は同じだった。小さいのは結晶が成長する途中だと考えれば、結晶成長の場合、方解石や食塩の結晶を割った逆のことが観察できるはずだ。しかしおかしいぞ、同じ固体でも石などを見れば必ずしも方解石のようなへき開は見られない、それなら結晶が成長するときは・・・？」

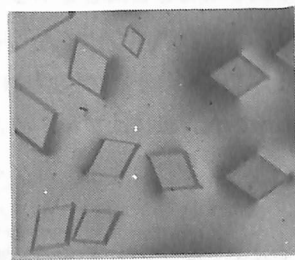


(図14) あわモデルと硫酸銅

生徒がこのような疑問をもてば固体粒子の予言学習は成功だろうと考える。この場合食塩の結晶と石の成分純度を考えさせ、石にへき開がみられない理由を、あわモデルの演示でみられた“大きい泡小さい泡の境”で説明してやればじゅうぶんに理解できるのである。結晶成長の実験観察で留意したいのは

- ・ ザロールを上げたスライドグラスを熱しすぎないこと(スライドグラスが割れる。凝固するのに時間がかかりすぎる。)
- ・ 核となるべきザロールを一粒投げ込むと結晶が成長しやすい。
- ・ 観察には顕微鏡より解剖顕微鏡やルーペを使用した方がわかりやすい(図15)。

また結晶の面角は物質特有の値をもつことを、測定しないまでも留意させる必要があろう。このことは第1学年で学習した「物質の見分け方」の一つの発展であり、理由づけとなって、さらに定着が期待できるからである。



(図15) 結晶成長(ザロール)

(4) 粒子概念の深まりとモデルとしての粒子

物質の三態について、ひととおり学習してきた生徒は、粒子概念が深まってゆけばゆくほど初め予想もしていなかった輝いた目で、各種の疑問を持ち込んできた。なかでも「粒子と粒子の中に何がはいっているのか」という疑問は、自由に討論させてみると“真空”という結論にまで至るが、その結論を出しても観念的に納得がいかないらしく、討論を何度かふり出しにもどしていた。いままでモデルを考えさせるとき、常にガラス玉・鉛玉を使っていたため、ガラス玉を“物質を造っている微視的なもの”という仮定で利用してきたのをいつのまにか無視し、ガラス玉自体の巨視性を観念として取り入れてしまったため、討論がふり出しにもどるのである。

このような疑問を生徒がいくからには、ここでもモデルとして利用してきたガラス玉に相当する粒子が実際にどれほどの大きさで、質量はどれほどなのかということを学習させ、生徒の心にあるモデルとしての粒子をいっそう確たるものに仕上げてゆく必要が強く感じられた。

5 粒子の大きさ

これまでに、粒子モデルを導入して、物質の状態変化や構造を有機的・統一的にとらえ、粒子的な見方・考え方を養ってきた。ここでは、物質の粒子性をより確固たるものにするために、“物質を構成している粒子の大きさや数”に目を向けさせ、単分子膜の実験を討論、測定、データの処理、グラフの解釈などの学習過程をへて、定量的、論理的に探究していくのが主なねらいである。

(1) 厚さの測定(直接測定と間接測定)

ブラウン運動の学習において、牛乳の粒子と水粒子の大きさの関係や粒子の数などについて半定量的にふれているが、事前調査でも明かなように、粒子とは“無限に小さいもの”、“質量のないもの”と漠然と考えている傾向がみられる。したがって、粒子の大きさや数を自分自身で測定できるということに、大きな驚きと関心を示している。しかし、極微の量を求めるのであるから、計算もかなり面倒であり、実験の意味についてもじゅうぶん理解して取り組めるよう、細心の準備が必要である。

そこで、単分子膜の実験にはいる第一段階として、既有的知識を駆使して、板の厚さを測定することから始めた。板にはアルミ板とアルミはくを用いる場合と、らく焼用のねんど板を用いる場合の両方について、クラスを変えて行なった。アルミ板、粘土板のような比較的厚いものは、“マイクロメータ”や“ものさし”で測定できることはよく知っている。しかし、これらの器具では測定できないアルミはくや分子・原子の大きさの測定法となると、生徒は一樣に考えこんでしまった。このいきづまりを打破するために、「体積と面積から厚さを求められるのでは——」というヒントをきっかけに、体積を面積で割ればよいことに気づき、

$$(\text{体積}) = (\text{質量}) \div (\text{密度}) \quad (1)$$

$$(\text{厚さ}) = (\text{体積}) \div (\text{面積}) \quad (2)$$

の関係が得られた。

このようにして、(1)、(2)式をは握したのち、実験にはいる。

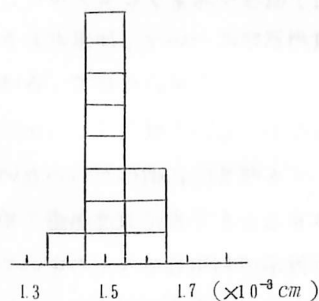
(a) アルミ板、アルミはくの厚さの測定

直方体のアルミ板の厚さをものさしで測る。

次に、アルミ板の質量を測定し、アルミニウムの密度が 2.7 g/cm^3 であることより体積を求めて厚さを求め、前の結果と比較する。

この過程をへて、アルミはくの厚さを(1)、(2)式を用いて測定する。

アルミはくの測定結果(1クラス分)のヒストグラムを(図16)に示す。



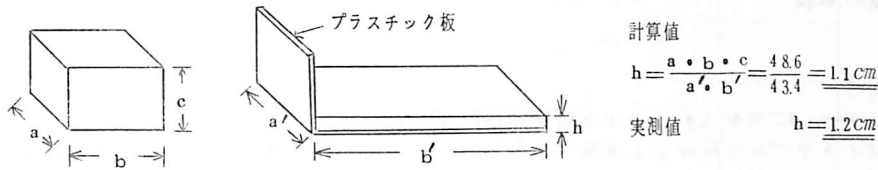
(図16) アルミはくの厚さ

(b) ねんど板の厚さの測定

(図17)のように、まず直方体の粘土板を与えて、各辺の長さを測定し、体積を求める。

次に、プラスチック板上にこのねんどを押し広げ、高さ(厚さ)がいくらになるかをものさしで調べる。

さらに、(2)式より厚さを計算し、ものさしによる測定値と比較する。(図17)に測定値の1例を示す。



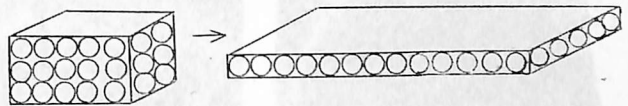
(図17) ねんど板の厚さの測定

以上の2つの実験は、どちらか一方を行えばよいのである。ここでは、膜厚を正確に測定することが目的ではなく、間接測定も直接測定と同じように正しい結果が得られるということをは握させることがねらいである。また、単分子膜の測定方法や計算の訓練の場としても重要な意義をもっている。したがって、指数による大きさの表わし方もここで扱った。

(2) 単分子膜の導入

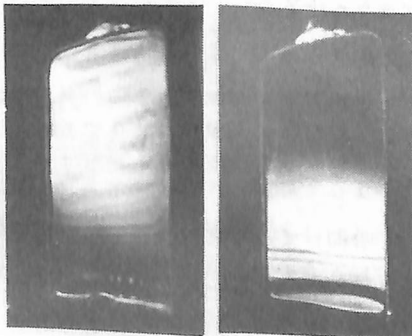
アルミ板からアルミはくへと(または粘土板を押し広げて)膜厚を薄くしていくと、基本粒子がどのように変化するかを図で表現させると、ほとんどの生徒が(図18)のようなモデル思考をしている。

そこで、アルミはくを引きのばしていくとアルミ粒子の厚さになると考える生徒もあったが、実際問題として、はくを粒子が1層になるまで広げることは技術的にむずかしいだろうという結論になった。

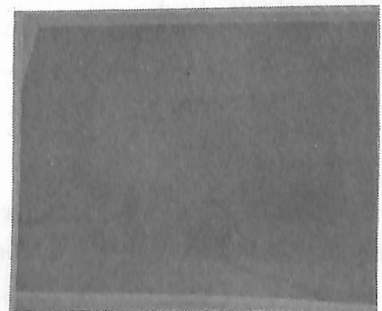


(図18)

次に、「液体はひとりでに広がって薄くなる」性質をもっていることに目を向けさせた。すなわち、水面に広がった油やシャボン玉が美しく色づいて見えるときの膜厚が 10^{-5} cm, 色がみえなくなるのは 10^{-6} cmであること(図19, 20), オレイン酸とかステアリン酸も油と同じように水に溶けず薄く広がり, 1滴でプールぐらいの広さにひろがることを知らせ, 単分子膜の実験にはいった。



(図19) シャボン玉膜(U字形の針金を石けん液にひたした直後(左)は色づいて見えるが, 数10秒たつと(右), 膜の上方はうすくなって光を反射しなくなる。それでも膜は存在する。)



(図20) 油の膜

(3) 単分子膜の実験

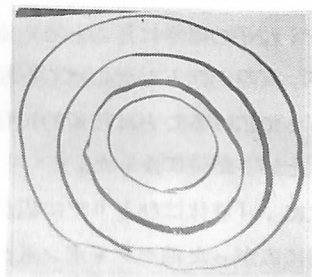
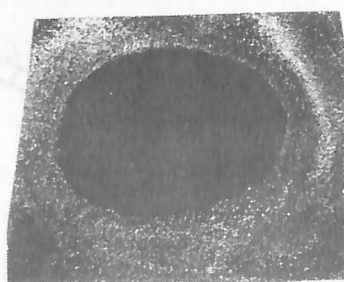
(a) 実験

〔実験方法〕

- (a) 4つ切バツに水を入れ、タルク粉を一様にまく。
- (b) スポイトでアルコールを1滴滴下して、いったん広がった膜が閉じることを確認する。
- (c) ステアリン酸のアルコール溶液(1/500)1滴を滴下し膜の面積をはかる。(溶媒として使ったアルコールは膜を作らない。)
- (d) 2・3・4滴についても同様に測定する。

〔実験上の留意点〕

- (a) 溶媒として用いたアルコールは膜を作らないこと、したがって、生じた膜はステアリン酸(オレイン酸)の膜であることを理解させる。
- (b) 面積は膜の長径・短径を求めその平均から求める。ラフになるので、結果の有効数字に留意させる。
- (c) 水の表面張力の関係で、アルコールを滴下しても閉じないことがしばしばあるので、水を手でよくかくはんしてから実験する。



(図21) 単分子膜の実験 (a)

(b)

(c)

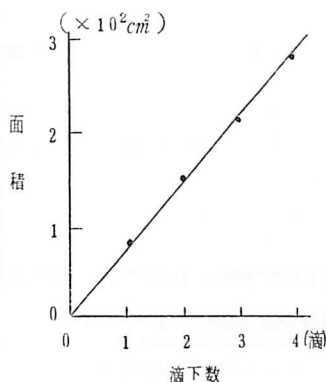
得られた結果より、落下滴数と面積との関係をグラフ化すると、(図22)のようになる。このグラフより(図23)のように、滴数と膜厚の関係のグラフを描く。

この2つのグラフをもとに、得られた膜厚について考えさせると、

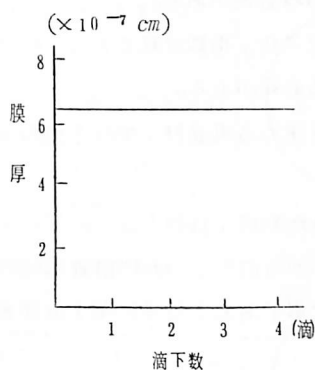
- ① ステアリン酸粒子の大きさを求める実験だから、ステアリン酸粒子の1辺の長さではないか。
- ② 目に見えない粒子が規則正しく1列に並んでおり、その粒子1個の大きさである。
- ③ 液体はひとりでに広がっていく。最大に広がって膜を作ったのだから、膜厚は最小になっているのではないか。

などの意見が出た。そこで、膜の面積が滴数に比例して増加していくことから、液滴数を $1/2$ 滴、 $1/4$ 滴と減らした場合を推論させた。そして、1滴の量をだんだん少くなくしても厚さは一様にちがいないこと、したがって1粒子分のステアリン酸を滴下したとしても膜厚は同じになるはずであり、この実験より得られた膜厚が最小の膜厚であることを導いた。

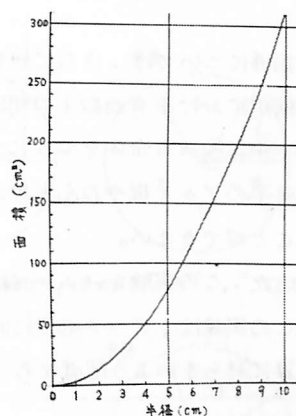
得られた膜厚をヒストグラム(1クラス分)に表わすと(図25)のようになり、どのグループも $6 \sim 8 \times 10^{-7}$ cmの範囲にあり、誤差を考慮すると、膜厚は一定であることを理解させることができた。



(図22) 滴下数と面積



(図23) 滴下数と膜厚



(図24) 計算図表

さらに、実験より得られた膜厚 (10^{-7} cm) はステアリン酸の薄膜の厚さであるから、

(実験より得られた膜厚) \geq (単分子膜の厚さ)
であることを握させた。そして、ステアリン酸の分子模型なども提示して、いろいろな研究から、これが単分子膜であることがわかっていることを教え、次の粒子の数に関する考察へと進めた。

(b) 考察

この実験では、計算がかなり面倒であり、生徒の計算での負担を極力軽減させるため、次のような手だてを講じた。

- ① 膜面積の計算は、半径より面積を求める計算図表(図24)を用いた。
- ② 膜厚の計算などは、電子式卓上計算機を用いた。
- ③ 計算の手順が明りようになるように、実験ノートを印刷配布して、それに記入していけば順次結論が得られるようにした。

膜の面積は、(図21)cのように、ガラス板に円周を描いて求めるようにした。

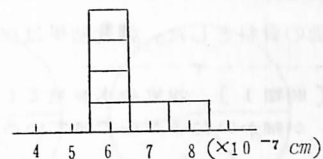
なお、膜厚などは指数で表わすように指導したが、かけ算、わり算はいったん小数になおしてから計算するようにした。

単分子膜の実験は、オレイン酸溶液もしばしば用いられるので、オレイン酸を用いても実施してみた。その結果のヒストグラム(1クラス分)を(図26)に示す。一般に、ステアリン酸溶液を用いた方が結果のバラッキが少なく、指導しやすいようである。

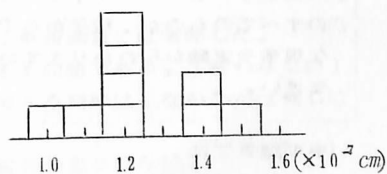
(4) まとめ

以上のように、かなり研究して実践を行なったのであるが、間接的な測定のため、むずかしいことが多く、非常に時間がかかった。主な問題点は次のとおりである。

- ① 周到な準備のもとに授業を行なっても、計算やデータの解釈などに非常に時間がかかる。この実験



(図25) ステアリン酸の例



(図26) オレイン酸の例

の指導については、さらに研究を進める必要がある。

- ② 測定における有効数字の問題、グラフ化、指数計算などは、平常の理科授業や数学科との関連が深く、中学校教育全体をつうじて考える必要がある。
- ③ 前半のアルミ板やねんど板の厚さを求める実験は、単分子膜の実験への導入および準備として、欠くことができない。

また、この実験をスムーズに行なうために、自動上皿てんびんが必要である。

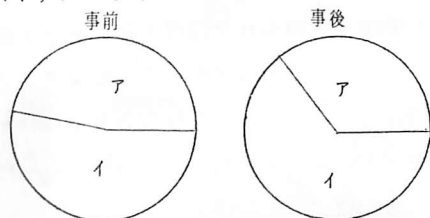
- ④ この実験は、データ処理に時間がかかるので、つねに計算しているものの内容を明確にし、単なる計算に終わらないよう配慮することが大事である(粒子に関する学習意識を失わせないようにする)。

6 実態調査について

実践研究にはいる前に、生徒の原子・分子に関する理解の程度を知るため、下記の問題により事前調査を行なった。さらに、研究終了後、同一問題(問題3.3を除く)により事後調査を実施し、研究の評価の資料とした。調査結果は次のとおりである。

〔問題1〕 空気や水を見て(見ただけで)、空気や水が細かい粒子からできていることがわかりますか。

(ア) はい (イ) いいえ



実際の観察から得られる知見と既習事項とを明確に区別できるか、を知るための問題である。事前調査では、「空気や水を見て」を、既習事項も含むと解釈した生徒が多いので、事後調査では()のように改めた。事後調査では、かなり「いいえ」が増えているが、出題のしかたに若干問題があるようである。

〔問題2〕 空気や水や、そのほかわたしたちのまわりのすべてのものが、粒子からできていることは、どんな現象や実験からわかりますか。知っているだけ書きなさい。

事前調査では、

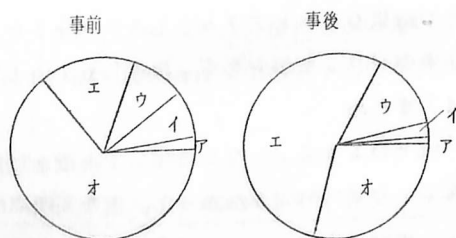
にじ、煙、雲、コップの外側の水滴などが多い。これに対し、事後調査では、

ブラウン運動、拡散、アルコールと水をまぜると体積が減少する。などが大半で、理解の深まりが見られる。

〔問題3〕 コップに水がいっぱいはいっています。

(1) この水は、およそ何個くらいの粒子からできていると思いますか。

(ア) 1000個(10^3 個)くらい (イ) 1億個(10^8 個)くらい (ウ) 1億個以上で1億の1億倍以内($10^8 \sim 10^{10}$) (エ) 1億個の1億倍(10^{10})以上 (オ) 無数(数えきれない)



(2) 粒子1個の重さは何gくらいと思いますか。

- (ア) $1/1000$ (10^{-3}) gくらい
 (イ) 1億分の1 (10^{-8}) gくらい
 (ウ) 1億分の1gよりも小さく、1億分の1gの1億分の1よりも大きい ($10^{-8} \sim 10^{-16}$ g)
 (エ) 1億分の1gの1億分の1よりも小さい (10^{-16} g以下)。 (オ) 重さはない。

(3) 粒子はどんな形をしていると思いますか。

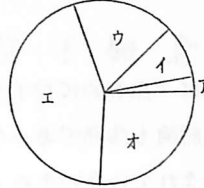
(4) この水をそのままこもらせて、氷にしました。粒子の数はどうなりますか。

- (ア) 水の方が多い。 (イ) 氷の方が多い。
 (ウ) 変わらない。

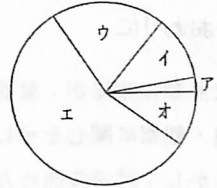
(5) この水と同じ体積の空気の中に含まれる粒子の数と、この水に含まれる粒子の数とでは、どちらが多いと思いますか。

- (ア) 水の方が多い (イ) 空気の方が多い
 (ウ) 同じ

事前

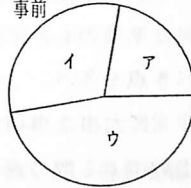


事後

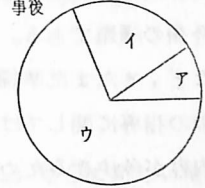


"球" が大半で、ほかに"円", "立方体" など

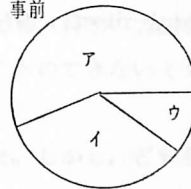
事前



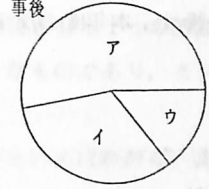
事後



事前



事後



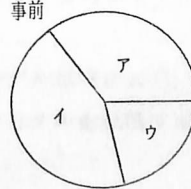
物質の粒子性についての生徒の知識を知るための問題であり、事後調査では、知識の定着度を調べることになる。

- (1) 粒子の数についての問題である。無数と答えた生徒が極めて多いが、事後調査では、それが激減しており、実証的な授業の効果が現われている。
 (2) 粒子の重さに関する問題であるが、事後調査では重さがないと考える者が僅少になり、(1)と同様な結論が得られる。
 (3) 授業において、粒子の形状についてはほとんどふれていないので、事後調査では省略した。
 (4) 状態変化によって質量が変わらないことを、ミクロの立場から考える問題である。「変わらない」と答える者が増加して、考え方の進歩が見られるが、重さ、質量に関する問題は、なかなか握しにくいものを含んでいることがわかる。
 (5) 液体と気体を粒子的に見る問題である。事前、事後でわずかしき変化が見られない。

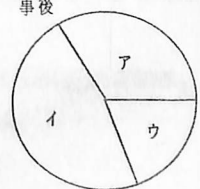
[問題4] 同数の粒子が規則正しくきちんと並んだときと、不規則に並んだときとでは、どちらが大きくなると思いますか。

- (ア) 規則正しく並んだときの方が大きい。
 (イ) 規則正しく並んだときの方が小さい。
 (ウ) 体積は同じ

事前



事後



粒子の並び方に関する問題で、エネルギーやエントロピーの概念につながる内容である。角砂糖や積木の並べ方など、日常経験でじゅうぶんわかるはずの問題であるが、事前と事後では、ややよくなったという程度の差しか現われていない。これは、固体の結晶のみを扱って、非結晶については一切ふれていないことが大きな理由と考えられる。

7 おわりに

大多数の生徒が、意欲的に“探究的に粒子モデルをは握していく学習”にあたった。特に、数多くの実験・観察に関心を示し、討論も活発であった。

しかし、討論の進め方になれていないため、各グループの煮つまった意見が必ずしも出てこない場合が多かった。これは、理科の授業だけでは解決できない大きな問題である。また、能力の高い生徒ほど最後まで興味を継続できたが、一方、途中で息切れしてしまう生徒に対してどのように指導していくかは、今後の課題である。周到な準備のもとに実践を行なったつもりであったが、映画やVTRの作成・利用など、まだまだ準備すべき点も多い。

指数の指導に関しては、非常に大事な事項で次の学習へとつながるものではあるが、粒子の指導だけでも内容が多すぎるため、指数による数の表わし方のみにとどめた。数学科とも関連があり、根本的な検討が必要だと思う。

今後は、本年度の反省にもとづいて、さらに研究を進めていきたい。

文 献

- 1) 下村忠行：新潟県立教育センター研究集録第5集理科研究編 (2) (1972), 9~16
- 2) 山内ほか訳：IPS物理, 岩波書店(1969)
- 3) 福田義一：熱と温度、評論社
- 4) アインシュタイン, インフェルト：物理学はいかに創られたか, 岩波書店